doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2018.04.02

克拉玛依市冬季飞机人工增雪作业效果统计分析①

李　斌[1]，　郑博华[1]，　兰文杰[2]，　杨　琳[2]

（1　新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室，新疆　乌鲁木齐　830002；　2　克拉玛依市气象局，新疆　克拉玛依　834000）

摘　要： 利用克拉玛依区气象站1957—2016年历年12月降水量观测资料，运用序列检验、不成对秩和检验以及 t－检验法等统计学方法，对开展冬季飞机人工增雪作业前历史期31 a和作业期29 a的年12月降水量作为统计变量，进行系统性差异分析。结果表明：开展冬季飞机人工增雪作业后克拉玛依市冬季12月降水量明显增加，降水量平均值增加了2 mm。运用非参数性不成对秩和检验显著性水平达到0.025，参数性 t－检验显著性水平也接近0.025。选取统计显著性水平0.1置信区间，计算得，冬季开展飞机人工增雪作业后，克拉玛依市平均年12月降水量绝对增加值为1.15 mm，相对增加率为24.5 %。从而得出：开展冬季飞机人工增雪作业后，克拉玛依市冬季降水量有了明显增加。

关　键　词： 飞机人工增雪；作业效果；统计分析

中图分类号： P481　　**文献标识码：** A　　**文章编号：**

随着我国西北干旱区极端气候/水文事件呈逐年增加趋势[1－2]，干旱仍然是制约我国西北经济社会发展的主要气象灾害之一。利用人工影响天气技术开发空中云水资源，已成为各地缓解旱情的主要手段之一。常倬林等[3]利用CERES资料对宁夏空中云水资源及增水潜力进行了研究，认为宁夏中部增水潜力最显著。高子毅[4]针对影响克拉玛依水源地的白杨河上游冬季可降水云系动力和热力结构进行了分析，得出不同条件下降水效率不同，特别地形云降水效率较低，具有增水潜力。王旭等[5]对天山山脉强降水云宏微观特征空间分布的研究，陈春艳等[6]对暖湿背景下新疆逐时降水变化特征研究，分别从云和降水角度对云降水资源特征进行了研究分析，对开发空中云水资源提供了基础信息。

人工影响天气效果检验是人工影响天气业务必不可少的重要环节。但由于很多复杂多变的不确定因素制约，科学严格的效果检验方法仍然是世界性难题[7]。世界公认的最著名的人工增水统计检验试验，是20世纪以色列60—70年代开展的人工增水试验，两期试验取得了增水13%～15%的统计检验结果[8]。20世纪1975—1986年，曾光平等[9]在福建古田水库开展了我国最著名的人工增水统计检验试验，试验取得了增水20%以上的统计学结论。近年来，国内部分学者也相继开展了人工增水作业效果统计检验工作。如：秦长学等[10]对北京密云水库人工增水作业效果进行统计分析，得出增水13%；李冰等[11]对夏季河南鸭河口水库流域人工增水作业效果评价为增水10.7%；钱莉等[12－13]运用多种统计检验法，得出1997—2004年甘肃河西走廊东部开展人工增水作业8 a平均累计增加降雨量131.5 mm，平均相对增雨率为26%，同时分析2002—2004年冬春季河西走廊东部开展增雪作业结果，结果为增加降雪量12.5 mm，平均相对增雪率为40.2%；贾烁等[14]对江淮对流云增水开展统计分析，结果相对增雨率高达63.18%，这表明对流云相对人工增水潜力更大。尹宪志等[15]从经济效益角度分析了甘肃省2004—2013年10 a开展飞机人工增水效益，平均投入产出比为1∶30。高子毅等[16－18]利用水文资料对乌鲁木齐河流域进行夏季人工增雨效果检验得出增水19.9%；运用同样的方法，对冬季人工增水作业后白杨河流域年径流量效果进行了两次统计评价，得出径流相对增加率分别为19.4%和11.6%。

① **收稿日期：** 2018－01－24；　**修订日期：** 2018－04－15
基金项目： 克拉玛依市科技计划项目(SK2016－45)
作者简介： 李斌(1968－)，男，研究员，硕士，主要从事大气物理及人工影响天气方面的研究. E-mail：btlibin@126.com

1　研究区概况

新疆克拉玛依油田是全国第四大油田,克拉玛依是国家重要石油石化基地,是世界石油石化产业聚集区。克拉玛依市地处准噶尔盆地西北缘,欧亚大陆中心区域。西北傍加依尔山,南依天山北麓,东濒古尔班通古特沙漠。中部、东部地势开阔平坦,向准噶尔盆地中心倾斜。克拉玛依市位于中纬度内陆地区,属典型的温带大陆性气候。其特点是:寒暑差异悬殊,干燥少雨,春秋季风多,冬夏温差大。积雪薄,蒸发快,冻土深。干旱、大风、寒潮等灾害天气频发。年平均降水量为 108.9 mm,而蒸发量高达为 2 692.1 mm,是同期降水量的 24.7 倍。由于严重缺水,20 世纪油田生产和城市生活用水主要依靠发源于克拉玛依北部乌肯拉卡尔山区的白杨河提供。但由于白杨河径流有限,常出现油田和城市供水紧张局面。自 20 世纪的 1988 年冬季至今,克拉玛依石油管理局及克拉玛依市政府,每年冬季 11 月中旬至次年元月中旬,租用一架飞机开展冬季飞机人工增雪作业,以缓解水资源短缺的局面。本文利用相关资料,就克拉玛依开展冬季飞机人工增雪作业以来的作业效果进行了统计分析,取得了初步结果。

2　资料与研究方法

2.1　材料

克拉玛依区气象站 1957 年建站,属国家基本站。至今已连续观测取得了近 60 a 的各种气象观测数据。克拉玛依冬季飞机人工增雪作业时段为每年的 11 月中旬至次年元月中旬。

本文所用克拉玛依市历年 12 月降水量资料,由克拉玛依区气象站观测提供。克拉玛依市 1957—2016 年历年 12 月降水量年际变化见图 1。1957—1987 年 31 a 历史期年 12 月平均降水量为 4.7 mm,年 12 月最大降水量出现在 1980 年,为 14.6 mm,最小降水量为 0.1 mm;1988—2016 年 29 a 作业期年 12 月平均降水量为 6.72 mm,年 12 月最大降水量出现在 1989 年为 16.9 mm。最小降水量为 1.2 mm。可以看出,无论最大降水量值、最小降水量值还是平均值,均为作业期大于历史期。特别是最小降水量值作业期是历史期的 12 倍。这对于干旱缺水季节,又急需降水的克拉玛依市,无疑起到了积极作用。

2.2　方法

目前人工增水作业效果的检验有三种途径:统计检验、物理检验和数值模拟检验[19]。本文采用的是统计检验方法。它是以数理统计为基础进行显著性检验,及对评估降水量与对比降水量的差值进行显著性检验。一般要求显著性水平达到≤0.05。其又分为非参数性检验和参数性检验两种。当统计变量的分布形式不确定的情况下,采用非参数性检验。它是分布之间的比较而非参数之间的比较。在总体分布已知,检验分布参数时,常采用参数性检验。最常用的参数性检验法为 t - 检验法,不过此方法要求统计变量要服从正态分布,可用柯尔莫哥洛夫配合

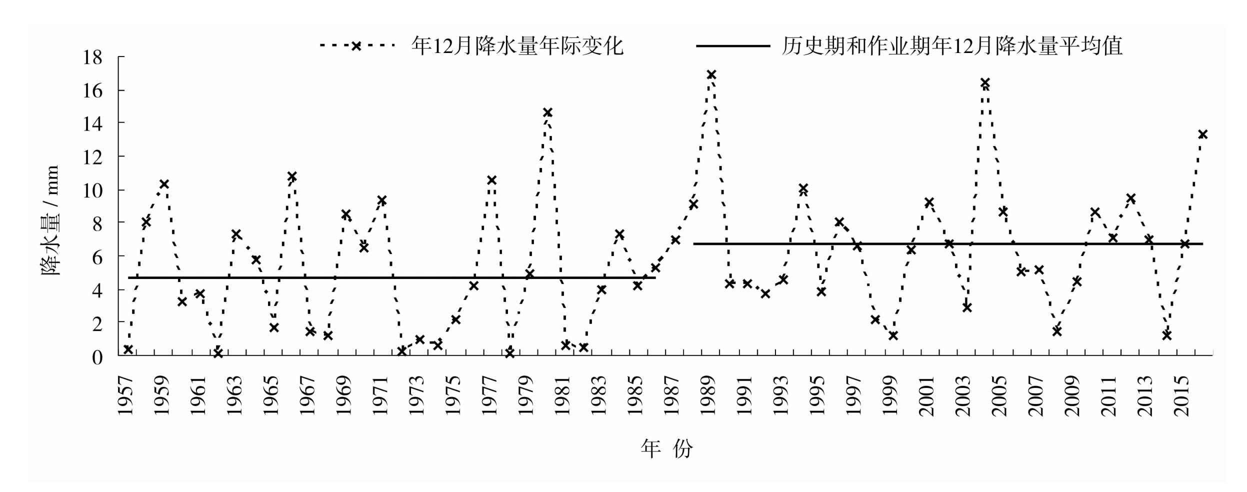


图 1　1957—2016 年克拉玛依市区年 12 月降水量年际变化,及历史期(1957—1987 年)和作业期(1988—2016 年)年 12 月降水量平均值

Fig. 1　Inter annual of precipitation data in December during 1957—2016 in Karamay, and mean values of historical period(1957—1987) and operational period(1988—2016)

适度检验法进行分布的拟合度检验;同时此方法还要求作业期和历史期两个正态总体的样本方差相等,可采用 F – 检验法进行检验[20]。

本文利用克拉玛依区气象站 1957—2016 年年 12 月降水量资料,对 1988 年开展冬季飞机人工增雪作业前 31 a,和作业后各 29 a(分别称为历史期、作业期)的降水量资料,利用非参数性和参数性统计检验方法确定作业前后年 12 月降水量的变化率的显著性,及其可能的增水量。之所以只选取 12 月的降水量代表冬季降水量作为统计变量,是因为每年 12 月整月都在实施飞机人工增雪作业,而 11 月开始和次年 1 月结束的作业时间具有不确定性。

本研究为科学定量评估克拉玛依市开展冬季飞机人工增雪作业效果,提供一定的分析方法和科学依据。为其它地区或区域开展增水作业评估工作提供一些技术方法借鉴。

3 结果及分析

3.1 序列试验法

此方法主要是依据目标区降水量历史资料,统计得到目标区降水量的历史平均值作为作业期自然降水量的估计值,然后与实测降水量比较,得出人工影响的效果估计值[20]。

克拉玛依站 12 月份降水量有 31 a 的历史资料,历史期年 12 月平均降水量为 $\bar{x}_2 = 4.70$ mm;作业期 12 月份降水量有 29 a 的资料,作业期 12 月平均降水量为 $\bar{x}_1 = 6.72$ mm。则开展人工增水作业后作业效果的绝对增加值为:$\Delta R = \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 2.02$ mm,相对增加率为:$E = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\bar{x}_2} \times 100\% \approx 42.98\%$。

即开展人工增水作业后比开展人工增水作业前的历史期年 12 月降水量平均增加了 2.02 mm,相对年 12 月降水量平均增加率为 42.98 %。

3.2 不成对秩和检验法

不成对秩和检验法是一种非参数性检验法。在人工增水试验过程中,有时作为统计变量的降水量,其分布形式不确定,因此作为这种检验是在分布之间进行,而不是在参数之间进行,称之为非参数性检验法。如秩和检验法等,是对人工增水作业前后统计指标变化的显著性进行检验。

将开展人工增水作业前历史期 31 a 的年 12 月降水量,和开展人工增水作业后 29 a 的年 12 月降水量按从小到大秩序列表计算。一般取样本容量小的秩和做比较[20],因此,本例中取开展人工增水作业前后样本容量小的作业期年 12 月降水量的秩和 $T = 1\ 016$ 做比较。已知开展人工增水作业后和作业前的样本容量分别为 $n_1 = 29$,$n_2 = 31$。

当 $n_1, n_2 > 10$ 时,秩和 T 近似于正态分布 $N\left(\frac{n_1(n_1+n_2+1)}{2}, \sqrt{\frac{n_1 n_2(n_1+n_2+1)}{12}}\right)$其中 n_1 为计算秩和的那个量的样本容量。此时可用正态分布来检验

$$u = \frac{T - 均值}{标准差} = \frac{T - \frac{n_1(n_1+n_2+1)}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 n_2(n_1+n_2+1)}{12}}}$$

对双边检验,若 u 值落在(−1.96, +1.96)之内,差异不显著;若 u 值落在(−1.96, +1.96)之外,差异显著,显著性水平为 0.05。单边检验时,若 $u \geqslant 1.64$(或 $u \leqslant -1.64$);则差异显著;否则不显著,显著性水平为 0.05[21]。

将 $n_1 = 29$,$n_2 = 31$,秩和 $T = 1\ 016$ 代入上式计算得 $u \approx 1.95$。因此,对于单边检验 $u > 1.64$,表明克拉玛依开展人工增水作业后,年 12 月降水量比历史期明显增加,人工增水作业效果明显,显著性水平 0.05 以上。经进一步查表得到显著性水平接近 0.025。

3.3 t – 检验法

t – 检验法是一种参数性检验法。它要求统计变量要服从正态分布,并要求作业前后不改变统计变量的方差[20]。在人工增水作业已开展多年,且历史期统计变量服从正态分布但样本容量较小($n < 30$)的条件下,差值的显著性检验采用两个样本(作业期样本和历史期样本)平均数之差的 t – 检验。由于在人工增水作业中只关心降水量是否增加,因此一般采用单边 t – 检验。计算如下:

3.3.1 统计变量选择 根据资料,选择 1957—1987 年每年 12 月降水量作为统计变量。

3.3.2 拟合度检验 采用柯尔莫哥洛夫配合适度检验法,对 1957—1987 年历史期年 12 月降水量进行正态分布检验,结果 $y_0 = \sqrt{n} D_n(x) \approx 0.67$,小于给定信度 $\alpha = 0.5$ 时的 $y_{0.5} = 0.83$,表明历史期年 12 月的降水量服从正态分布,其配合适度为 $P(\sqrt{n} D_n(x) \geqslant y_0) \sim 1 - k(y_0) = 0.76$,正态分布拟合度较高。同理,对 1988—2016 年作业期年 12 月降水量

进行正态分布检验,结果 $y_0=\sqrt{n}D_n(x)\approx 0.46$,小于给定信度 $\alpha=0.5$ 时的 $y_{0.5}=0.83$,表明作业期年 12 月降水量也服从正态分布,其配合适度为 $P(\sqrt{n}D_n(x)\geqslant y_0)\sim 1-k(y_0)=0.98$,正态分布拟合度非常高。

3.3.3　*方差检验*　利用 F 检验法,对历史期和作业期年 12 月降水量方差的变化进行显著性检验。经计算历史期方差 $S_2^2=15.359\,33$,自由度 $\nu_2=31-1=30$;作业期方差 $S_1^2=16.117\,91$,自由度 $\nu_1=29-1=28$。$F=\frac{S_1^2}{S_2^2}$为具有参数 ν_1、ν_2 的 $F-$变量。为实际计算查表方便,常将方差大的作为第一样本,方差小的作为第二样本。计算得 $F\approx 1.05$,小于给定信度 $\alpha=0.01$ 时的 $F_{0.01}=1.87$,表明人工增水作业未改变总体方差。

3.3.4　*t-检验计算*　在 3.3.2 和 3.3.3 计算结果的前提下,用 $t-$检验法对人工增水作业效果进行检验。采用两个样本平均数之差的显著性检验和区间估计。以人工增水作业前历史期年 12 月降水量的平均值作为人工增水作业后,作业期年 12 月降水量平均值的期待值。

$$t=\frac{(\bar{x}_1-\bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2+(n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}}\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}}$$

相关计算见表 1。将 $\bar{x}_1=6.72$,$S_1^2=16.117\,9$,$n_1=29$;$\bar{x}_2=4.7$,$S_2^2=15.359\,3$,$n_2=31$ 代入上式计算得:$t=1.969\,2$,单边检验,显著性远大于 $t_{0.05}=1.672$,接近 $t_{0.025}=2.002$。因此,经 $t-$检验,克拉玛依市冬季飞机人工增雪作业效果显著,显著性水平接近 0.025。

利用下式进行区间估计:

$$u_1-u_2>(\bar{x}_1-\bar{x}_2)-t_{2\alpha}S\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}$$

其中 $S=\sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2+(n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-1}}$,$u_1-u_2$ 为开展人工增水作业后年 12 月平均降水量增加量。上式成立的概率为 $(1-\alpha)$。

取置信水平 $(1-\alpha)=0.9$,将 $t_{0.2}=0.848\,5$ 以及有关数据代入公式,计算得 $u_1-u_2>1.15$ mm。即作业期开展飞机人工增水作业后,年 12 月平均降水量增加了 1.15 mm,其可信度为 90 %。

表 1　克拉玛依市历年 12 月降水量作为统计变量的样本差值的显著性检验计算表

Tab. 1　Calculation of the sample difference significance test with the annual precipitation data in December as statistical variables in Karamay

	年份	x_2/ mm	$(x_{2i}-\bar{x}_2)^2$		年份	x_1/ mm	$(x_{1i}-\bar{x}_2)^2$
	1957	0.4	18.49		1988	9.1	5.76
	1958	8.1	11.56		1989	16.9	104.04
	1959	10.3	31.36		1990	4.3	5.76
	1960	3.2	2.25		1991	4.3	5.76
	1961	3.7	1.00		1992	3.7	9.00
	1962	0.1	21.16		1993	4.6	4.41
	1963	7.3	6.76		1994	10.1	11.56
	1964	5.7	1.00		1995	3.8	8.41
	1965	1.7	9.00		1996	8.0	1.69
	1966	10.8	37.21		1997	6.6	0.01
	1967	1.5	10.24		1998	2.2	20.25
	1968	1.2	12.25		1999	1.2	30.25
	1969	8.5	14.44		2000	6.4	0.09
	1970	6.5	3.24		2001	9.2	6.25
历	1971	9.4	22.09	作	2002	6.7	0.00
	1972	0.3	19.36		2003	2.9	14.44
	1973	0.9	14.44		2004	16.5	96.04
史	1974	0.6	16.81	业	2005	8.7	4.00
	1975	2.2	6.25		2006	5.1	2.56
	1976	4.2	0.25		2007	5.2	2.25
期	1977	10.6	34.81	期	2008	1.4	28.09
	1978	0.1	21.16		2009	4.5	4.84
	1979	4.9	0.04		2010	8.7	4.00
	1980	14.6	98.01		2011	7.1	0.16
	1981	0.6	16.81		2012	9.5	7.84
	1982	0.5	17.64		2013	6.9	0.04
	1983	4.0	0.49		2014	1.2	30.25
	1984	7.3	6.76		2015	6.7	0.00
	1985	4.2	0.25		2016	13.3	43.56
	1986	5.3	0.36				
	1987	7.0	5.29				
	$n_2=31$				$n_1=29$		
	$\bar{x}_2=\frac{1}{n_2}\sum_{j=1}^{n_2}x_{2j}=4.7$				$\bar{x}_1=\frac{1}{n_1}\sum_{j=1}^{n_1}x_{1j}=4.7$		
	$S_2^2=\frac{1}{n_2-1}=\sum_{j=1}^{n_2}(x_{2j}-\bar{x}_2)^2=15.359\,3$				$S_1^2=\frac{1}{n_1-1}=\sum_{j=1}^{n_1}(x_{1j}-\bar{x}_1)^2=16.117\,9$		

由此可得,开展飞机人工增雪作业后使得年 12 月降水量相对增加率为 $E=\frac{u_1-u_2}{\bar{x}_2}=\frac{1.15}{4.7}\approx 0.245$。

即增水率为 24.5 %。

3.4 讨论

由于长期以来,全球气候变暖等天气背景因素影响,加之云、降水自然变差比较大,导致自然降水时—空分布变化很大,致使人工催化效果的“信号”,常被淹没在自然降水起伏的“噪声”中。统计分析相当于从这些高“噪声”中提取人工催化效果“信号”的信息提取技术方法。因此,统计检验方法的功效往往不高[19-21]。但是,就目前的人工影响天气作业技术和检验方法,统计检验方法是检验人工影响天气作业效果的主要方法之一。从统计学和人工影响天气角度考虑,序列试验法方法简单,但要达到 0.05 的显著性水平,对作业效果的绝对值要求相当高,而这往往是不现实的,因此其可信度有限[21];非参数性检验法只能对作业效果进行可信度的定性检验,无法进行定量区间估计检验;参数性检验如 t - 检验法和 Welch 检验法,相对于以上两种检验方法对作业效果检验较为准确可信,但其对样本数量、总体分布等数据有一定的要求,计算过程也要求较高。如能找到相应的对比区,采用区域回归试验法,检验功效、准确度会较高[19]。在采用统计检验的同时,还应注重利用天气雷达回波变化等信息开展物理检验,以体现人工作业效果的物理机制和物理响应。

4 结论

利用统计学有关评估检验方法,以历年 12 月降水量作为统计变量,对克拉玛依市冬季飞机人工增雪作业效果开展了评价分析。得出初步结论如下:

(1) 历年 12 月降水量,无论最大值、最小值和平均值,均为作业期大于历史期。其数值分别增加了 2.3 mm、1.1 mm、2.02 mm。特别是最小降水量作业期是历史期的 12 倍。这对于缓解水资源短缺的矛盾具有积极作用。

(2) 统计评估检验表明,序列试验虽然得到了较高的增水量和相对增加率,但其可信度有限。经非参数性不成对秩和检验,作业期增水效果显著,显著性水平达 0.025。在符合参数性 t - 检验条件的前提下,经 t - 检验,增水效果显著性接近 0.025。证明开展冬季飞机人工增雪作业后,克拉玛依市冬季降水量增加效果显著。

(3) 选取显著性水平为 0.1,及可信度为 90% 的置信水平,进行区间估计得出,开展冬季飞机人工增雪作业后,平均年 12 月降水量增加了 1.15 mm,相对增水率为 24.5 %。

(4) 本文运用序列检验、不成对秩和检验以及 t - 检验法等统计学方法,对克拉玛依市冬季飞机人工增雪作业效果进行了科学分析和评价。既给出了定性结论、又得到了定量结果。为科学定量评估克拉玛依市开展冬季飞机人工增雪作业效果,提供了一定的分析方法和科学依据。为其它地区或区域开展增水作业评估工作提供一些技术方法借鉴。今后,应进一步做好飞机增雪作业方案设计工作,运用区域回归等其它统计学方法开展进一步研究;同时,还应注重利用天气雷达回波变化等信息开展物理检验,从物理机制和物理响应方面证明人工增水作业效果。

参考文献(References)

[1] 刘金平,包安明,李均力,等. 2001—2013 年中亚干旱区季节性积雪监测及时空变异分析[J]. 干旱区地理,2016,39(2):405-412. [LIU Jinping, BAO Anming, LI Junli, et al. Spatial and temporal characteristics of snow cover in arid area of Central Asia from 2001 to 2013[J]. Arid Land Geography,2016,39(2):405-412.]

[2] 陈亚宁,王怀军,王志成,等. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J]. 干旱区地理,2017,40(1):1-9. [CHEN Yaning, WANG Huaijun, WANG Zhicheng, et al. Characteristics of extreme climatic/hydrological events in the arid region of northwestern China[J]. Arid Land Geography,2017,40(1):1-9.]

[3] 常倬林,崔洋,张武,等. 基于 CERES 的宁夏空中云水资源特征及其增雨潜力研究[J]. 干旱区地理,2015,38(6):1112-1120. [CHANG Zhuolin, CUI Yang, ZHANG Wu, et al. Characteristics and developing potential of cloudwater resource in Ningxia with the CERES data[J]. Arid Land Geography,2015,38(6):1112-1120.]

[4] 高子毅,张建新,胡寻伦,等. 新疆云物理及人工影响天气文集[C]. 北京:气象出版社,1999:13-22. [GAO Ziyi, ZHANG Jianxin, HU Xunlun, et al. Collected papers of cloudy physics and weather modification in Xinjiang[C]. Beijing: Meteorological Press,1999:13-22.]

[5] 王旭,张嘉伟,马禹,等. 天山山脉强降水云宏微观物理属性的空间分布特征[J]. 干旱区地理,2016,39(6):1154-1161. [WANG Xu, ZHANG Jiawei, MA Yu, et al. Spacial distribution of macro and micro physical properties of clouds during heavy rains over Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography,2016,39(6):1154-1161.]

[6] 陈春艳,赵克明,阿不力米提江·阿布力克木,等. 暖湿背景下

新疆逐时降水变化特征研究[J]. 干旱区地理,2015,38(4):692－702. [CHEN Chunyan,ZHAO Keming,ABLIKIM Ablimitijan,et al. Temporal and spatial distributions of hourly rain intensityunder the warm background in Xinjiang[J]. Arid Land Geography,2015,38(4) :692－702.]

[7] 李大山,章澄昌,许焕斌,等. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社,2002:325. [LI Dashan,ZHANG Chengchang,XU Huanbin, et al. Weather modification current situation and prospect[M]. Beijing,Meteorological Press,2002:325.]

[8] 章澄昌. 人工影响天气概论[M]. 北京:气象出版社,1992:252－253. [ZHANG Chengchang. Weather modification generality [M]. Beijing:Meteorological Press,1992:252－253.]

[9] 曾光平,方仕珍,肖锋. 1975—1986 年古田水库人工降雨效果总分析[J]. 大气科学,1991,15(4):97－108. [ZENG Guangping,FANG Shizhen,XIAO Feng. The total analysis of the effect of artificial rainfall in Gutian Reservoir Area, Fujian (1975—1986)[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,1991,15(4):97－108.]

[10] 秦长学,张蔷,李书严,等. 密云水库蓄水型增水作业效果分析[J]. 气象科技,2005,33(S1):74－77. [QING Changxue,ZHANG Qiang,LI Shuxue,et al. Analysis of artificial rainfall effect at Miyun Reservoir[J]. Meteorological Science and Technology,2005,33(S1):74－77.]

[11] 李冰,李海彬,孙长林,等. 人工增雨作业效果评价方法[J]. 气象与环境科学,1999,(3):43－44. [LI Bin,LI Haibin,SUN Changlin,et al. Evaluation methodology of artificial rainfall effect [J]. Meteorological and Environmental Sciences,1999,(3):43－44.]

[12] 钱莉,俞亚勋,杨永龙. 河西走廊东部人工增雨试验效果评估[J]. 干旱区研究,2007,24(5):679－685. [QIAN Li,YU Yaxun,YANG Yonglong. Assessment on artificial rainfall experiment in the east Hexi Corridor[J]. Arid Zone Research,2007,24(5):679－685.]

[13] 钱莉,王文,张峰,等. 河西走廊东部冬春季人工增雪试验效果评估[J]. 干旱区研究,2006,23(2):349－354. [QIAN Li,WANG Wen,ZHANG Feng,et al. Assessment on the artificial snowfall experiment in the east Hexi Corridor in winter and spring [J]. Arid Zone Research,2006,23(2):349－354.]

[14] 贾烁,姚展予. 江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析[J]. 气象,2016,42(2):238－245. [JIA Shuo,YAO Zhanyu. Case study on the convective clouds seeding effects in Yangtze Huaihe Region[J]. Meteorological Monthly,2016,42(2):238－245.]

[15] 尹宪志,徐启运,张丰伟,等. 近 10 年甘肃春季飞机人工增雨经济效益评估[J]. 江西农业学报,2015,27(11):64－72. [YIN Xianzhi,XU Qiyun,ZHANG Fengwei,et al. Evaluation of economic benefit of aircraft artificial precipitation enhancement in spring in Gansu Province during recent 10 years[J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2015,27(11):64－72.]

[16] 高子毅,张建新,廖飞佳,等. 新疆天山山区人工增雨试验效果评价[J]. 高原气象,2005,24(5):734－740. [GAO Ziyi,ZHANG Jianxin,LIAO Feijia,et al. The effect evaluation for precipitation enhancement experiment in Tianshan Mountains of Xinjiang[J]. Plateau Meteorology,2005,24(5):734－740.]

[17] 高子毅. 克拉玛依白杨河流域人工降水效果的统计评价[J]. 沙漠与绿洲气象,1990,(8):29－31. [GAO Ziyi. Statistical evaluation of artificial rainfall effect in Baiyang River in Kelamayi [J]. Desert and Oasis Meteorology,1990,(8):29－31.]

[18] 高子毅,刘广忠. 克拉玛依山区人工增水效果的再评价[J]. 沙漠与绿洲气象,2000,23(1):23－26. [GAO Ziyi,LIU Guangzhong. Evaluation of artificial rainfall effect at mountainous area in Kelamayi again[J]. Desert and Oasis Meteorology,2000,23(1):23－26.]

[19] 陈光学,段英,吴兑,等. 火箭人工影响天气技术[M]. 北京:气象出版社,2008:192－193,199. [CHEN Guangxue,DUAN Ying,WU Dui,et al. Rocket weather modification technology[M]. Beijing:Meteorological Press,2008:192－193,199.]

[20] 中国气象局科技教育司. 人工影响天气岗位培训教材[M]. 北京:气象出版社,2003:212－213,218,220. [Science and Technology Education Department of China Meteorological Administration. On-the-job training materials of weather modification[M] . Beijing:Meteorological Press,2003:212－213,218,220.]

[21] 叶家东,范蓓芬. 人工影响天气的统计数学方法[M]. 北京:科学出版社,1982:161,284,339. [YE Jiadong,FAN Peifen. Statistical mathematical methods of weather modification[M]. Beijing:Science Press,1982:161,284,339.]

Statistical analysis of effect of aircraft artificial snowfall enhancement in winter at Karamay

LI Bin[1], ZHENG Bo-hua[1], LAN Wen-jie[2], YANG Lin[2]

(1 *Weather Modification Office of Xinjiang Uygur Autonomous Region*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*;

2 *Kelamayi Meteorological Bureau in Xinjiang*, *Karamay* 834000, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: In order to objectively evaluate the effect of the aircraft artificial snowfall enhancement in winter in Karamay, Xinjiang, China, it is need to analyze the systematic significance of snowfall enhancement. In this paper, utilizing the sequence test, unpaired rank sum test and t-test of statistical methods, the systematic differences of annual precipitation in December of the former historical period 31 a and the latter period 29 a of the carrying out the aircraft artificial snowfall enhancement are analyzed in Karamay, with annual precipitation data of Karamay Weather Station in December from 1957—2016, as a beginning to carry out the aircraft artificial snowfall enhancement in 1988. The results show that the precipitation in December in Karamay was significantly increased in December after the operation of the aircraft artificial snowfall enhancement, regardless of the maximum, minimum and average value. It added 2.3 mm, 1.1 mm and 2.02 mm respectively. In particular, the minimum rainfall period is 12 times that of the historical period. This would play a positive role in alleviating the shortage of water resources. The inspection significance level of non-parameter unpaired rank sum test is 0.025, and the inspection significance level of parametric t-test is also close to 0.025. According to the calculation, the absolute increase of the precipitation in Karamay in December is 1.15 mm, and the relative enhancive rate is 24.5% after carrying out the aircraft artificial snowfall enhancement in winter in Karamay when the statistical significant level $\alpha = 0.1$ is chosen. Therefore, through carrying out the aircraft artificial snowfall enhancement in winter, it is significant for the precipitation enhancement in Karamay, it has a certain effect on the local tense production and domestic water consumption in arid areas. Remarkable social and economic benefits. This paper makes a reasonable utility of statistical methods to analyze the effects of aircraft artificial snowfall enhancement in the winter in Karamay, and concludes the qualitative conclusions and the quantitative results. It is of some guiding significance to design and evaluate the application of aircraft artificial precipitation enhancement in science.

Key words: aircraft artificial snowfall enhancement; effect; statistical analysis